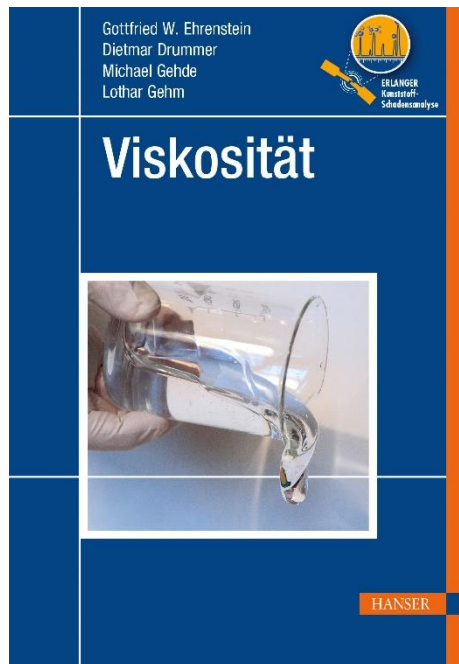


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Viskosität

von Gottfried W. Ehrenstein, Dietmar Drummer,  
Michael Gehde und Lothar Gehm

Print-ISBN: 978-3-446-47272-3  
E-Book-ISBN: 978-3-446-47290-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472723>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Gedankwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Geleitwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>Herausgeber und Autor</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Viskosität und Ähnliches</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kennwerte .....	2
1.1.1 Dynamische Viskosität $\eta$ .....	4
1.1.2 Kinematische Viskosität $\nu$ .....	4
1.1.3 Relative Viskosität $\eta_{\text{rel}}$ .....	5
1.1.4 Spezifische Viskosität $\eta_s$ .....	5
1.1.5 Weitere rheologische Einheiten, Skalen .....	5
<b>2 Aussagemöglichkeiten und Grenzen der Rheometrie</b> .....	<b>7</b>
2.1 Nullviskosität .....	8
2.1.1 Definition .....	8
2.1.2 Bedeutung der Nullviskosität .....	11
2.1.3 Dehn- vs. Scherviskosität .....	12
2.2 Messungen gemäß DIN und Berechnung der Viskosität .....	14
2.3 Messfehler bei rheologischen Untersuchungen .....	16
<b>3 Viskosität-Messverfahren</b> .....	<b>21</b>
3.1 Kapillarviskosimeter .....	22
3.1.1 Normaldruck Kapillarviskosimeter .....	24
3.1.1.1 Messprinzip .....	24
3.1.1.2 Kennwerte der Viskosität .....	25
3.1.1.2.1 Viskositätszahl – Staudinger-Funktion .....	26
3.1.1.2.2 Grenzviskosität – Staudinger-Index .....	27
3.1.1.2.3 K-Wert nach Fikentscher .....	28

3.1.1.3	Aussagemöglichkeiten und Grenzen der Lösungsviskosität .....	29
3.1.1.4	Versuchsdurchführung .....	30
3.1.1.5	Fehlerquellen .....	31
3.1.2	Hochdruckkapillarrheometer .....	34
3.1.2.1	Messprinzip .....	35
3.1.2.2	Fehlerquellen .....	36
3.1.2.3	Gezielter Gegendruck .....	36
3.1.3	Geschwindigkeitsgeregeltes Kapillarrheometer .....	37
3.1.4	Mehrfach Kapillarrheometer .....	37
3.1.5	Versuchsdurchführung .....	38
3.1.6	Schmelzindex (MVR/MFR bzw. MVI/MFI) .....	39
3.1.6.1	Messprinzip .....	40
3.1.6.2	Versuchsdurchführung .....	41
3.1.6.3	Fehlerquellen .....	43
3.1.7	Korrekturen .....	44
3.1.7.1	Bagley-Korrektur .....	44
3.1.7.2	Cogswell-Korrektur .....	45
3.2	Rotations- und Oszillationsrheometer .....	47
3.2.1	Messprinzip (Couette/Searle) .....	48
3.2.2	Messgeometrie .....	50
3.2.2.1	Zylinder-in-Zylinder-Geometrie .....	51
3.2.2.2	Kegel-Platte-Geometrie .....	52
3.2.2.3	Platte-Platte-Geometrie .....	54
3.2.2.4	Rabinowitsch/Weissenberg Korrektur .....	56
3.2.2.5	Relative Geometrie .....	57
3.2.3	Mechanische Beanspruchung .....	57
3.2.3.1	Stationäre Beanspruchung .....	57
3.2.3.2	Dynamische (oszillatorische) Beanspruchung .....	58
3.2.3.3	Anwendung von Rotations- und Oszillationsmessungen .....	58
3.2.4	Versuchsdurchführung .....	61
3.2.4.1	Trimmen .....	62
3.2.4.2	Temperaturkonstanz .....	64
3.2.4.3	Thixotropie .....	64
3.2.4.4	Fehlerquellen .....	65
3.3	Auslaufbecher .....	66
3.3.1	Messprinzip .....	66
3.3.2	Versuchsdurchführung .....	67
3.3.3	Fallbeispiele .....	68
3.3.4	Auslaufbecher in der Schüttguttechnik .....	70

3.4	Kugelfallviskosimeter .....	72
3.4.1	Messprinzip .....	72
3.4.2	Versuchsdurchführung .....	74
<b>4</b>	<b>Stoffliche und prozesstechnische Einflüsse .....</b>	<b>77</b>
4.1	Schergeschwindigkeit in der Düse .....	77
4.2	Molekulargewicht, Molekulargewichtsverteilung .....	81
4.3	Einfluss Feuchte .....	84
4.4	Einfluss Druck .....	86
4.5	Strömung und Struktur .....	87
<b>5</b>	<b>Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>93</b>
5.1	Kunststoffspezifische Aussagen .....	93
5.1.1	Styrolpolymerisate .....	93
5.1.2	Polykondensate .....	94
5.1.3	Gefüllte Systeme .....	94
5.1.4	Reaktionsharze .....	95
5.1.5	Verarbeitbarkeit .....	96
5.1.6	Topfzeit .....	97
5.1.7	Gelzeit .....	97
5.1.8	Vergleich der Gelzeit-Messverfahren .....	99
5.1.9	Viskositätsabhängigkeit von der Scherrate, gemessen mit und ohne Gegendruck im Hochdruckkapillarrheometer .....	101
5.2	Qualitätssicherung .....	102
5.2.1	Wareneingangskontrolle und Qualitätssicherung .....	103
5.2.2	Abhängigkeit der Viskosität bei Mehrfachverarbeitung im Vergleich zur Neuware .....	106
5.2.3	Granulat .....	107
5.2.4	Alterungsverhalten .....	107
5.3	Schadensanalytik .....	108
5.3.1	Polyamid-Dübel .....	108
5.3.2	Frontscheibe eines Flugzeugs .....	108
5.3.3	Schadensfallbeispiel Polycarbonat .....	110
5.3.4	Lackiertes Bauteil aus ASA/PC .....	111
5.3.5	Extrudierte Polyamid-Profile .....	112
5.3.6	Silikone .....	114

<b>6</b>	<b>Normen</b> .....	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Verwendete Literatur</b> .....	<b>119</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenanhang</b> .....	<b>121</b>
	<b>Index</b> .....	<b>129</b>

# Geleitwort

Dieses Buch, der achte Band des Kompendiums „ERLANGER Kunststoff-Schadensanalyse“ von Professor G.W. Ehrenstein, trägt den passenden Titel „Viskosität“. Die Viskosität ist nach wie vor die Schlüsseleigenschaft der Rheologie, die 1920 ihren Anfang nahm, als Eugene Bingham und Markus Reimer das Wort Rheologie prägten, und im selben Jahr Hermann Staudinger der Welt offenbarte, dass Polymere keine Kolloide, sondern Makromoleküle sind. 1920 demonstrierte Staudinger, wie die Viskosität direkt mit dem Molekulargewicht zusammenhängt, und entlarvte damit die Theorien, auf die Wissenschaftler zuvor ihr Verständnis von Polymeren gestützt hatten, als falsch. Heute ist die Viskosität und ihre Abhängigkeit vom Molekulargewicht, der Verformungsgeschwindigkeit, der Temperatur, der Feuchtigkeit und der Alterung immer noch eines der wichtigsten Diagnosewerkzeuge für den praktizierenden Ingenieur und Wissenschaftler. Die Viskosität ist das Bindeglied zwischen dem Molekül und dem Endprodukt. Sie steuert nicht nur, wie das Polymer in ein Endteil umgewandelt wird, sondern trägt auch Informationen über die Molekularstruktur, die die Eigenschaften eines Bauteils beeinflussen. Professor Ehrenstein und seinem Kollegen Dipl.-Ing. L. Gehm ist es gelungen, dies im vorliegenden Band hervorragend zu erläutern.

Der Band beginnt mit der Definition der verschiedenen Begriffe der Viskosität wie Schmelzindex, so wie auch dynamische, kinematische, relative und spezifische Viskosität. Es folgt eine Diskussion der verschiedenen Faktoren, die die Größe der Viskosität beeinflussen, nämlich Schergeschwindigkeit, Feuchtigkeitsgehalt, Druck, Strömung und Molekularstruktur. Nach der Einführung in die Grundlagen stellen die Autoren die verschiedenen Messverfahren vor, die dem Praktiker zur Verfügung stehen, darunter das Kapillarviskosimeter, der Auslaufbecher, das Kugelfallviskosimeter und die verschiedenen Rotationsrheometer. All diese rheometrischen Techniken werden mit dem kompletten Gleichungssatz vorgestellt, der es dem Ingenieur erlaubt, die Messungsergebnisse vollumfänglich hinsichtlich ihres Entstehens zu beurteilen. An dieser Stelle bringen die Autoren dem Leser die verschiedenen Anwendungen von Viskositätsmessungen nahe, wie z.B. bei gefüllten Systemen und Reaktionsharzen. Die Autoren schließen mit der Darstellung verschiedener Fallstudien ab, in denen sie aufzeigen, wie die Viskosität als Werkzeug

zum Verständnis des Versagens verschiedener Komponenten dienen kann – von der Qualitätskontrolle des Materials, das in eine Produktionsanlage gelangt, bis hin zum Versagen eines Flugzeugfensters oder eines ausgefallenen extrudierten Polyamidprofils. Die praktischen Beispiele lehren den Leser nicht nur, wie man die verschiedenen verfügbaren Techniken zur Beurteilung der Vorgänge einsetzt, sondern vermitteln praktische Erfahrung auf diesem Gebiet.

Dieses Buch ist sehr empfehlenswert für jeden Techniker, Ingenieur oder Berater, sowohl für die Arbeit im Feld wie im Labor. Es empfiehlt sich überdies als pädagogisches Hilfsmittel, um Ingenieurstudenten wichtige Diagnosewerkzeuge bei der Untersuchung des Versagens von Kunststoffteilen zu vermitteln.

Chemikern, Physikern und Ingenieuren ermöglichte die Viskosität als wichtige Eigenschaft von Polymerwerkstoffen, deren Struktur und Verarbeitbarkeit zu verstehen und wird deshalb seit Langem als Diagnosewerkzeug zur Fehlersuche bei Versagen von Kunststoffprodukten eingesetzt. Aus diesen Gründen ist dieses Buch sowohl für den Praktiker als auch für den Theoretiker unverzichtbar.

Madison, WI, Januar 2024

*Tim Osswald*

### **Tim Osswald**

Tim Osswald ist Professor für Maschinenbau und Direktor des Polymer Engineering Center an der University of Wisconsin-Madison. Nach seiner Promotion in Maschinenbau an der University of Illinois at Urbana-Champaign auf dem Gebiet der Polymerverarbeitung verbrachte er zweieinhalb Jahre als Alexander-von-Humboldt-Stipendiat am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Aachen, Deutschland. Er erhielt 2001 den VDI-K Dr.-Richard-Escales-Preis. Im Jahr 2006 wurde er zum Ehrenprofessor der Universität Erlangen-Nürnberg in Deutschland und 2011 zum Ehrenprofessor der Nationalen Universität von Kolumbien ernannt. Professor Osswald lehrt die Verarbeitung von Polymeren und Polymerverbundwerkstoffen sowie das Konstruieren mit Polymeren und Polymerverbundwerkstoffen und forscht zudem in diesen Bereichen. Professor Osswald hat über 300 Arbeiten veröffentlicht, die Bücher *Materials Science of Polymers for Engineers* (1996, 2003, 2012), *Polymer Processing Fundamentals* (1998), *Injection Molding Handbook* (2001, 2007), *Compression Molding* (2003), *Polymer Processing Modeling and Simulation* (2006), *International Plastics Handbook* (2006, 2019), *Saechtling Kunststoff Taschenbuch* (2007, 2013, 2022), *Plastics Testing and Characterization* (2008), *Understanding Polymer Processing* (2010, 2017), *Polymer Rheology* (2015) und *Discontinuous Fiber Composites* (2020) (alle beim Hanser Verlag erschienen). Seine Bücher wurden ins Italienische, Deutsche, Spanische, Japanische, Chinesische, Koreanische, Farsi und Russische übersetzt. Professor Osswald ist auch der Reihen-

herausgeber von *Plastics Pocket Power* (Hanser 2001), das derzeit 6 Bücher umfasst, ist der Herausgeber für *Polymer Composites*, Herausgeber des amerikanischen *Journal of Polymer Engineering* und der englischsprachige Herausgeber des *Journal of Plastics Technology*. Professor Osswald ist zudem im wissenschaftlichen Beirat mehrerer Industrien tätig, ist einer der Mitbegründer der Madison Group und gehört einer Kommission zur Schaffung eines Wissenschaftsministeriums in Kolumbien an.





# Herausgeber und Autor



(Quelle: LKT Erlangen)

## **Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Gottfried Wilhelm Ehrenstein †**

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Gottfried Wilhelm Ehrenstein (1937 – 2021) wurde in Danzig geboren und studierte nach einem humanistischen Abitur an der Technischen Hochschule Hannover Allgemeinen Maschinenbau. Nach der Promotion (Prof. Matting) arbeitete er 10 Jahre in der Anwendungstechnischen Abteilung Kunststoffe der BASF AG und war gleichzeitig Lehrbeauftragter und nach der Habilitation 1976 Privatdozent der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH, Prof. Macherauch). Von 1977 bis 1989 war er Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoff-

kunde/Kunststoffe der Universität-Gesamthochschule Kassel. Nach Ruf an die TU Harburg, die Montanuniversität Leoben und die TU Berlin war er ab 1989 Professor für Kunststofftechnik des von ihm neu eingerichteten Lehrstuhls der Universität Erlangen-Nürnberg.

Von 1987 bis 1992 war er nebenamtlich Leiter des Süddeutschen Kunststoffzentrums in Würzburg. 1992 wurde er Honorarprofessor des Chemischen Instituts der Universität Qingdao, China, und 1996 Ehrendoktor der Technischen Universität Budapest. Prof. Ehrenstein war zudem vereidigter Sachverständiger der IHK Nürnberg für Kunststoffe und Sonderwerkstoffe auf Kunststoffbasis und des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin.

Er war Gründer des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK), der Dissertationsdatenbank und der Zeitschrift Kunststofftechnik im Rahmen von *www.kunststoffe.de* mit Unterstützung des Carl Hanser Verlages.

Prof. Ehrenstein war verheiratet und Vater von drei Söhnen.



### **Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer**

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer wurde 1971 in Forchheim/Ofr. geboren und hat nach einem mathematisch-naturwissenschaftlichen Abitur Fertigungstechnik in Erlangen studiert. Nach der Promotion (Prof. Ehrenstein) arbeitete er 6 Jahre bei der OECHSLER AG als Leiter Technologie-Management und war gleichzeitig Lehrbeauftragter an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Seit 2009 leitet er den Lehrstuhl für Kunststofftechnik der FAU und zudem am Standort Fürth das Bayerische Polymerinstitut (BPI)

und das Geschäftsfeld Kunststoffe der Neue Materialien Fürth GmbH (NMF).

Seit 2011 hat er eine Gastprofessur an der East China University in Shanghai, seit 2013 zudem an Central South University in Changsha, China. Prof. Drummer ist seit 2016 im Beirat „Material“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung sowie als Sachverständiger und Gutachter für Industrie, Gerichte sowie das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) tätig.

Er ist Mitglied der wissenschaftlichen Arbeitskreise Kunststofftechnik (WAK) und Werkstofftechnik (WAW) sowie langjähriger Herausgeber der Zeitschrift Kunststofftechnik im Rahmen von kunststoffe.de mit Unterstützung des Carl Hanser Verlages.



### **Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde †**

Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde studierte an der Universität in Gh-Kassel Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Kunststoffwerkstofftechnik und Konstruktion. Nach seiner Promotion 1993 zum Schweißen von Kunststoffen wechselte er 1994 als Technischer Leiter zur Wegener GmbH, wo er von 1997 bis 2004 die Geschäftsführung Technik innehatte und Gesellschafter wurde. 2004 gründete er die „Ingenieurtechnik Gehde“.

2005 erhielt er den Ruf auf die W3-Professur Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz. Er übernahm dort bis zu seiner Pensionierung die Leitung des Lehrstuhls Kunststoffe. Zudem war er langjährig Direktor des Instituts für Fördertechnik und Kunststoffe der TU Chemnitz. Michael Gehde war Mitglied zahlreicher Wissenschaftsvereinigungen und Verbände.

Die Forschungsarbeiten von Michael Gehde waren von dem ganzheitlichen Ansatz der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung in der Kunststofftechnik geprägt. In

intensiver Zusammenarbeit mit der Industrie betrieb er die Umsetzung der Erkenntnisse der Forschung in Werkstoff- Prozess- und Konstruktionsinnovationen.



### **Lothar Gehm**

Lothar Gehm studierte Meteorologie und Physik in Mainz. Sein besonderes Interesse fand immer die Anwendung der theoretischen Modelle in die Praxis. So absolvierte er weiterhin ein Studium der Ingenieurwissenschaft, Spezialgebiet Mess- und Regelungstechnik. Er arbeitete bei verschiedenen Firmen in Großbritannien, Frankreich und der Schweiz, bevor er ab 1984 die Sparte Mess- und Medizintechnik der Contraves AG in Zürich leitete. 1992 gründete er dann die Firma proRheo GmbH, die rheologische Messgeräte entwickelt und herstellt.

Außer den standardmäßigen Messgeräten beschäftigte sich Lothar Gehm besonders mit der Entwicklung hochempfindlicher Messgeräte für dünnflüssige Flüssigkeiten (insbesondere für medizinische Anwendungen) wie auch mit der Viskositätsmessung durch Rotationsrheometer direkt im Fertigungsprozess.

Lothar Gehm ist seit 1994 öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Rheologie. Er hat sich in dieser Funktion mit verschiedensten Anwendungen der Rheologie beschäftigt, z. B. bei Schadensfällen, Patentanmeldungen oder -streitigkeiten. Außerdem berät er in dieser Funktion Firmen bei der Entwicklung, Verarbeitung und Herstellung von fließenden Stoffen jeglicher Art.



# 1

## Viskosität und Ähnliches

Die Viskosität ist ein Maß für die Fließfähigkeit einer Substanz. Diese wird von einer Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt. In der Kunststoffverarbeitung werden fast alle Thermoplaste über die schmelzflüssige Phase verarbeitet, ergeben aber ein Produkt im festen Zustand. Die Übergänge von fest in flüssig und umgekehrt sind wenig genau festgelegt, bei kristallinen Strukturen zumindest direkt durch das Schmelzen der kristallinen Bereiche erfassbar, bei amorphen dagegen ist er bislang nicht definiert messbar. Die Bedeutung für die maschinelle Verarbeitbarkeit ist sowohl wissenschaftlich wie auch praktisch noch nicht erfasst.

Duroplaste werden ebenfalls über die flüssige Phase verarbeitet. Reaktive Harzsysteme können in flüssiger oder in fester Form vorliegen, aus der sie durch Erhitzen geschmolzen werden müssen. Das Fließverhalten der reaktionsfähigen Harzansätze nach dem Mischen aller vielfältigen Komponenten gibt Aufschluss über die Füllvorgänge im Werkzeug. Im weiteren Verarbeitungsprozess gibt es Einflüsse auf die Viskosität durch die Werkzeugtemperaturen und die chemischen Reaktionen mit komplexen Überlagerungen durch die wirkenden Drücke und Fließformen.

Die Fließfähigkeit eines Kunststoffes wird als Widerstand der Probe unter Scherung oder Dehnung verstanden und dementsprechend als Scher- bzw. Dehnviskosität bezeichnet.

Eine Besonderheit der Kunststoffe liegt darin, dass

- die meisten Kunststoffe über die schmelzflüssige/flüssige Phase verarbeitet werden; bei teilkristallinen Thermoplasten ist im Gegensatz zu amorphen eine Schmelztemperatur definiert;
- Kunststoffe viskos-elastisch relaxierendes Verhalten zeigen und dadurch die Fließantwort des Kunststoffes bei Scherung oder Dehnung zeitabhängig ist;
- die Fließfähigkeit eines Kunststoffes direkt mit dessen physikalischen und chemischen Zustand korreliert
- Kunststoffe zur Identifizierung in Flüssigkeiten gelöst werden können; das Fließverhalten der Lösung kann Aufschluss über molekulare Zustände liefern
- Kunststoffe makromolekulare Werkstoffe mit kettenförmiger Struktur und physikalischen mit 500-fach festeren chemischen Bindungen ausgestattet sind.

- Die Fließfähigkeit des Kunststoffes ist damit nicht nur für die Verarbeitung relevant, auch in der Bauteil- und Schadensanalyse wird die Fließfähigkeit des Kunststoffes bestimmt. Hier gilt es, Rückschlüsse auf den molekularen Zustand und dadurch bedingte Bauteileigenschaften zu erhalten.

## ■ 1.1 Kennwerte

Es gibt weit über 100 Begriffe, die sich mit der Viskosität befassen. Die wesentlichen sind in der DIN-Reihe der DIN EN ISO 3219 genormt. Eine Viskositätsangabe, d.h. ein Viskositätswert, ist der Quotient aus zwei Messwerten und somit das Ergebnis einer Berechnung und weiterhin abhängig von der Messart. Je nach verwendeter Methode der Bestimmung wird somit als ein methodenabhängiger Messwert berechnet und angegeben.

Mit der Viskosität  $\eta$  kennzeichnet man einen Punkt des Fließverhaltens z.B. der nicht vernetzenden Thermoplast- und Elastomer-Schmelze, aber auch der duroplastischen und elastomeren chemischen sich verfestigenden Formmassen während der Verarbeitung, wobei die Art und Form der Strömung auf deren Gleichmäßigkeit und Konstanz einen großen Einfluss haben.

Der hohen Bedeutung in der Verarbeitung folgend, wird überwiegend die Viskosität als Widerstand des Fluids unter Scherung verstanden und als Scherviskosität bezeichnet, Volumenverformungen als Volumenviskosität bzw. Dehnverformungen als Dehnviskosität. Als kinematische Viskosität  $\nu$  bezeichnet man den Quotienten aus der dynamischen Viskosität  $\eta$  des Mediums und seiner Dichte  $\rho$ . Die dynamische Viskosität  $\eta$  ist das Verhältnis von Schubspannung  $\tau$  und Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  und somit ein Maß für die Zähigkeit eines Fluids. Sie beschreibt das Verformungsverhalten eines Fluids bei mechanischer Belastung oder Verformung. Die dynamische Viskosität  $\eta$  [Pa·s] und die kinematische Viskosität  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] stehen über die Dichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] in direktem Zusammenhang:

$$\eta = \nu \cdot \rho$$

Mit dem Begriff Viskosität soll das Fließverhalten einer Probe beschrieben werden. Hierbei wird im Labor unter definierten Laborbedingungen eine Probe definiert belastet. Sie wird insbesondere geschert und/oder gedehnt, teils auch gestaucht. Die hierbei wirkenden Kräfte können – bei Verwendung von genormten Messgeometrien – exakt bestimmt werden. Bei der Verarbeitung hingegen treten zusätzlich unterschiedlichste Rand- und Umgebungsbedingungen wie z.B. Wandgleiten oder Inhomogenitäten und Temperaturgradienten auf. Somit sollte in diesem Zusammenhang von Konsistenz der Probe gesprochen werden.

Um das vollständige Fließverhalten einer Probe in ihrer Applikation beschreiben zu können, sind mehrere unterschiedliche Versuchsdurchführungen notwendig. Mit nur einem rheologischen Messpunkt im Labor lässt sich ein Kunststoff für seine Verarbeitung nicht vollständig beschreiben. Die Aufzeichnung mehrerer Messpunkte des Fließverhaltens bei unterschiedlichen Strömungen bezeichnet man als Fließkurve.

Fließkurven bei Scherbelastung beschreiben den Zusammenhang der Scherviskosität  $\eta$  in Pa·s mit der auf den Thermoplasten wirkenden Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  in 1/s, und der sich daraus einstellenden Schubspannung  $\tau$  in Pa.



Um das rheologische Verhalten von Thermoplasten vergleichend beschreiben zu können, ist die Aufnahme und Interpretation der Fließkurven unbedingt nötig.

Nahezu alle Thermoplaste, aber auch nicht gehärtete duroplastische Reaktions- und Kondensationsharze und Elastomere werden im schmelzflüssigen Zustand verarbeitet. Der schmelzförmige Zustand wird bei Thermoplasten durch äußere und innere Erwärmung – bei Duroplasten und Elastomeren im nicht polymerisierten Zustand – ggf. auch durch Aufschmelzen erreicht. Starken Einfluss auf das Aufschmelzen hat der Druck, ein weiterer Einfluss auf die Viskosität ergibt sich durch seine Feuchte. Zu Letzterem ist wenig bekannt. Eine Temperatur, die für amorphe Thermoplaste den Übergang vom gummielastischen in den fließfähigen Zustand kennzeichnet, ist bislang nicht definiert.



Die Kenntnisse des viskosen Verhaltens von Kunststoffschmelzen im Hinblick auf die praktische Anwendung sind noch geringer als z. B. die Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften fertiger fester Kunststoffe.

Die Rheometrie beschreibt die Messmethoden zur Messung der Fließeigenschaften. Sie zielt auf unterschiedliche definierte Belastungen auf den Kunststoff unter definierten Randbedingungen und der messtechnischen Erfassung der Werkstoffantwort. Meist wird entweder eine Kraft oder ein Druck appliziert und die Fließverformung des Kunststoffs gemessen, teils erfolgt die Versuchsdurchführung auch umgekehrt.

Dem Ziel definierter, konstanter Randbedingungen bei der Messung stehen werkstoffliche Veränderungen (z. B. molekularer Abbau, Vernetzung) und die Änderung physikalischer Randbedingungen (ggf. Temperaturänderung durch Friktion) entgegen und setzen Grenzen in den Prüfparametern.



### 1.1.1 Dynamische Viskosität $\eta$

Die dynamische Viskosität  $\eta$  wird dann als Newtonsche Viskosität verstanden, wenn das Verhältnis von Schubspannung ( $\tau$ ) zu Geschwindigkeitsgefälle oder Schergeschwindigkeit ( $\dot{\gamma}$ ) konstant ist. Kunststoffschmelzen oder -lösungen sind im Allgemeinen Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten, d. h. dass sich der Viskositätswert mit der Schergeschwindigkeit ändert.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

In älterer Literatur wird noch die alte nicht-SI-Einheit Centipoise cP ( $1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 10 \text{ g}/\text{cm} \cdot \text{s} = 10 \text{ P (Poise)} = 1000 \text{ cP}$ ) verwendet.

### 1.1.2 Kinematische Viskosität $\nu$

Die kinematische Viskosität  $\nu$  ist das Verhältnis der dynamischen Viskosität  $\eta$  zur ihrer Dichte  $\rho$ . Sie gilt nur für Newtonsche Flüssigkeiten. Die Messwerte sind nur vergleichbar bei gleichen Schergeschwindigkeiten.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Dichtebezogene Effekte auf die Viskosität können mit der Bestimmung der kinematischen Viskosität gezielt herausgearbeitet werden.



Um strukturelle/molekulare Veränderungen eines Thermoplasten beschreiben zu können, ist die vergleichende Messung unter gleichen Randbedingungen unbedingt nötig.

Mit der Viskosität kennzeichnet man das Fließverhalten der Thermoplast-Schmelze, aber auch der duroplastischen und elastomeren, chemisch sich verfestigenden Schmelzen während der Verarbeitung, wobei die Art und Form der Strömung auf deren Gleichmäßigkeit und Konstanz einen großen Einfluss haben können.

### 1.1.3 Relative Viskosität $\eta_{rel}$

Das dimensionslose Verhältnis der Viskosität einer Polymerlösung bei einer bestimmten Konzentration ( $\eta$ ) und der Viskosität des reinen Lösungsmittels ( $\eta_0$ ) bei gleicher Temperatur wird als relative Viskosität ( $\eta_{rel}$ ) bezeichnet.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0}$$

Es wird unterschieden in:

- mit Relativsystem gemessene Viskosität, d.h. keine Absolutviskosität in Pa·s, Angabe oft in Skalenteilen oder Prozent
- Quotient aus der Viskosität der untersuchten Lösung und der Viskosität des reinen Lösemittels siehe auch DIN 1342

### 1.1.4 Spezifische Viskosität $\eta_s$

Die spezifische Viskosität beschreibt die Zunahme der relativen Viskosität mit der Konzentration des Kunststoffes in der Lösung.

$$\eta_s = \frac{\eta_r - \eta_0}{\eta_0}$$

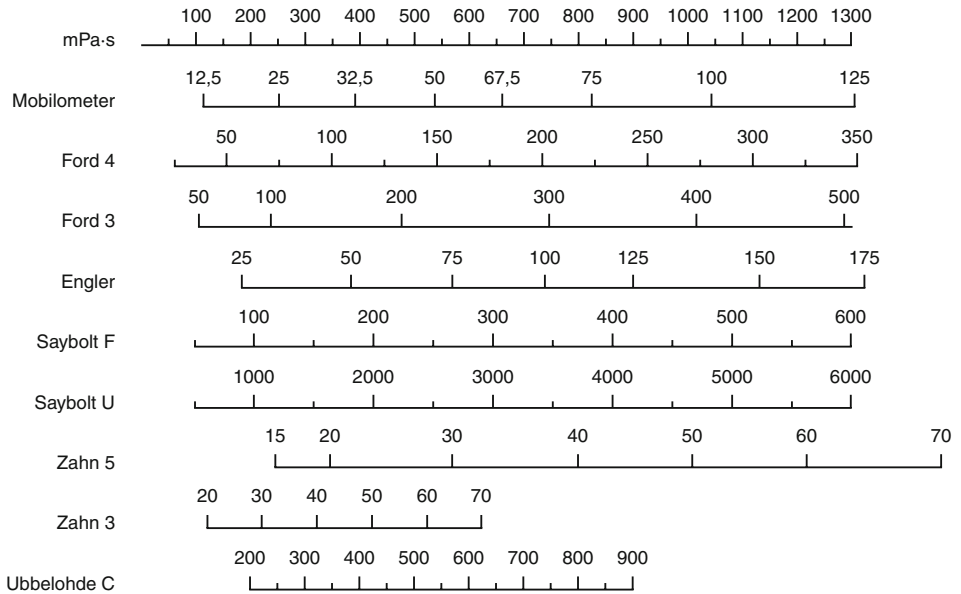
Sie ist weiterhin proportional zu deren Molmasse der Lösung oder des Kunststoffes.

### 1.1.5 Weitere rheologische Einheiten, Skalen

Regional spezifisch und auch historisch bedingt sind in der Literatur teils noch weitere Kennwerte der Viskosität zu finden, Tabelle 1.1.

**Tabelle 1.1** Vergleich unterschiedlicher Skalen

[°E]	Engler-Grade (Deutschland)
[S''] oder [SSU]	Saybolt Universal Sekunde (USA)
[SSF]	Saybolt Furol Sekunde (USA)
[R'']	Redwood Standard (No. 1) Sekunde (Großbritannien)
[RA]	Redwood Admiralty Sekunde (Großbritannien)
[B]	Barbey cm <sup>3</sup> /h (Frankreich)



**Bild 1.1** Unterschiedliche rheologische Skalen

# Index

## A

ABS 93  
ABS/PA 93  
ABS/PC 93  
Additivgehalt 22  
Alterung 107  
amorpher Thermoplaste 11  
Anlieferung 105  
Anlieferungszustand 105  
Anmischen 100  
ASA 93, 111  
ASA/PC 111  
Ausbesserungsarbeiten 108  
Ausflussgeschwindigkeit 71  
Auslaufkanal 69  
Auslaufbecher 17, 66  
Auslaufmassenstrom 71  
Auslaufzeit 66  
Auswertung 58

## B

Bagley-Korrektur 35, 44  
Bauform 68  
Befüllungsfehler 55  
Belastungsgeschwindigkeit 13  
Benetzungsfähigkeit 114  
Berechnungsformel 61  
Bewertung der Messergebnisse 21  
Bingham Fluide 54  
Blasformen 78  
Blendmorphologie 89  
Bostwick-Viskosimeter 17

## C

Campus 77  
Casson 54  
Chemikalienresistenz 7  
Cogswell-Korrektur 45  
Copolymerisate 89  
Couette 48  
CR-Rheometer 47  
CS-Rheometer 47

## D

Dehnströmung 88  
Dehnung 12  
Dehnavisiosität 46, 78  
Depolymerisation 85  
Dietzel & Drückner 52  
dominierende Scherströmung 88  
Doppelkapillarrheometer 45  
Druck 86  
Druckabfall 35  
Druckabhängigkeit 86  
Druckaufnehmer 36  
Drücke 77  
Durchlaufzeit 32  
Durchströmbarkeit 71  
Duroplaste 1  
duroplastische Systeme 95  
dynamische Beanspruchung 58, 60  
dynamische Viskosität 2, 4

## E

Eigenverstärkung 88  
Einflussgrößen 22  
Einlaufkante 69

Einlaufstrecke 74  
 Einwegmessgeometrien 96  
 elastischen Eigenschaften 78  
 Elastomere 3  
 Entnahmestellen 8  
 erstarrte Randschicht 88  
 Extrapolationsfehler 10  
 Extrusion 77  
 Extrusionsblasformen 12  
 Extrusionsdruck 42

## F

Faserlängen 88  
 fehlerhafte Charge 59  
 Fehlerquellen 31, 65  
 Feuchte 70, 77, 84  
 Fikentscher-Gleichung 29  
 Fisher-Johns-Methode 98  
 Fließfähigkeit 1  
 Fließfeldkoeffizient 15  
 Fließfront 12  
 Fließgesetz 52  
 Fließkurven 3  
 Fließratenverhältnis 40  
 Fließvorgang 10  
 flow rate ratio 40  
 freies Auslaufen 69  
 freies Volumen 85  
 Fremdkörper 70  
 Fremdüberdruck 23  
 Frontscheibe 108  
 Füllstoffe 22

## G

gefüllte Proben 55  
 gefüllte Systeme 94  
 gefüllte Werkstoffsysteme 54  
 Gegendruck-Hochdruckkapillarrheometer 36  
 Gelpunkt 95  
 Gelpunktsbestimmung 99  
 Geltimermessungen 101  
 Gelzeit 96f., 99f.  
 Geometriefehler 55  
 Gerätekonstante 74  
 Geschwindigkeitsgefälle 50  
 Geschwindigkeitsgradient 88  
 Geschwindigkeitsprofil 87

glasfaserverstärkten Thermoplasten 105  
 Glaskapillare 24  
 Glasübergang 86  
 Glasübergangsbereich 101  
 Glasübergangstemperatur 86  
 Gleichgewicht 61  
 Gleit-Haft-Bewegungen 44  
 Granulat 107  
 Grenzflächenkräfte 52  
 Grenzviskosität  $[\eta]$  27f.  
 Gut-Charge 59

## H

Hagen-Poiseuille 23  
 Hagen-Poiseuille-Gesetz 32  
 Herschel-Bulkley 54  
 Hochdruckkapillarrheometer 34f., 37, 101  
 hydrolysierbare Gruppen 85

## I

Identifizierung der Kunststoffe 103  
 inhärente Viskosität 27  
 innere Gleitmittel 93  
 In-Process-Messungen 67  
 intrinsische Viskosität 27

## K

Kapillarviskosimeter 14, 17, 22  
 Kautschukanteil 112  
 Kegel-Platte-Geometrie 52  
 Kegel-Platte-Messsysteme 15  
 Kettenspaltungsreaktionen 85  
 Kettenverzweigung 78  
 kinematische Viskosität 2, 4  
 kleine Schergeschwindigkeit 106  
 kohäsive Schüttgüter 71  
 Kolbengeschwindigkeit 35  
 komplexe Viskosität 48  
 Kondensationsharze 3  
 konstanter Massedruck 24  
 konstanter Prüfkolbengeschwindigkeit 24  
 Korngröße 70  
 Kornverteilung 70  
 Kreiskapillare 24, 35  
 Kristallbildung 88  
 Kugelfallviskosimeter 14, 17, 72

Kugelkalotte 32  
Kuhn-Mark-Houwink-Sakurada-Gleichung  
28, 84  
K-Wert 28  
K-Wert-Erniedrigung 105  
K-Wert nach Fikentscher 28

## L

lackierte Heizkörperhalter 111  
Laminarität 57  
Leckstrom 78  
linear-viskoelastischen Deformationsbereich 55  
Log. Viskositätszahl 27  
Lösemittel 32  
Lösemittelbestandteil 111  
Lösemittelfallen 61  
Lösen eines Kunststoffes 32  
Lösungskonzentration 32  
Lösungviskosität 29, 109  
Lufteinschlüsse 44

## M

Makromolekül 81  
Mark-Houwink-Gleichung 28  
Massenmittelwert 83  
Materialabbau  
– starker (VZ) 113  
Mehrfach-Kapillarviskosimetern 37  
Mehrfachverarbeitung 103f.  
melt flow index 39  
melt flow rate 39  
Melt-Rheometer 39  
Messart 2  
Messbereich des Messgeräts 58  
Messgeometrien 50  
Messgeräte 21  
Messmarken 24  
Messspalt 55  
Messsystemgeometrien 52  
Messverfahren 21  
Messzeiten 43  
methodenabhängiger Messwert 2  
MFR 18, 124  
MFR-Prüfgerät 35  
Mindestmolekulargewicht 7  
mittlere Molekulargewicht 83  
mittlere Molekülmasse 83

Molekulargewicht 7, 28, 78, 81f.  
Molekulargewichtsverteilung 7, 78, 81, 83  
Molekülkettenlänge 22  
Molekülmassenverteilung 22  
Molmasse 5  
Molmassenmittel 84  
Molmassenverteilung 105  
Monomerlösungen 51  
Mooney & Ewart 52  
MVR 18, 43, 124

## N

Neuteil 110  
Newtonsche Flüssigkeit 59  
Newtonsches Plateau 60  
Nicht-Newtonische Flüssigkeiten 59  
Nicht-Newtonische Proben 62  
niedrigeres Molekulargewicht 111  
Normaldruck-Kapillarviskosimetern 24  
Normalspannungskräfte 52  
Nulldüse 45f., 101  
Nullviskosität 8, 10f.

## O

Oberflächenbeschaffenheit 70f.  
Oberflächenspannung 114  
Orientierungsmaximum 88  
Ostwald-deWale 54  
oszillations Rheometer 47  
Oszillationsrheometer 18  
oszillatorische Beanspruchung 58  
Owens-Wendt-Methode 114

## P

PA 105  
PA-6 123  
PA-66 123  
PA-69 123  
PA-610 123  
Paraffinwaxse 93  
PBTP 105  
PE 105  
PE-HD 82  
PE-LD 82  
Penetrometer 18  
PETP 105

Platte-Platte-Geometrie 54  
 Platte-Platte-Messgeometrien 62  
 Platte-Platte-Messsysteme 15  
 Polyamid-Dübel 108  
 Polycarbonat 110  
 Polyesterharze 96  
 Polykondensate 94  
 Polymerisationsgrad 29, 39, 83  
 Polymerschmelze 9  
 Prinzip der zwei Scherflächen 47  
 Produktionskontrolle 26  
 Prüfverfahren 21  
 PS 93

## Q

Qualitätssicherung 103

## R

Rabinowitsch/Weissenberg Korrektur 56  
 Randbedingungen 21  
 reaktionsfähige Harzansätze 1  
 Reaktionsharze 95  
 Reaktionswärme 95  
 Recyclingmaterial 113  
 Reinigungsspray 110  
 Relativ-Messsystemen 57  
 repräsentative Messwerte 52  
 Reproduzierbarkeit 19  
 Restmonomergehalt 44  
 rheologische Einheiten 5  
 rheologische Stoffdaten 77  
 Rheometrie 3  
 Rieselfähigkeit 70  
 Roscoe 52  
 Rotationskörper 50  
 Rotationsrheometer 18f., 47  
 Rotationsversuch 59  
 Rotationsviskosimeter 15, 85  
 Runddüse 42

## S

SAN 93  
 Sauberkeit der Prüfeinrichtung 43  
 Schadensteile 107  
 schadhafte Materialcharge 111  
 Schadteil 110

Schergeschwindigkeit 47, 54, 106  
 schergeschwindigkeitsgesteuertes Rheometer 47  
 Scherströmung 14, 51  
 Scherung 12, 48, 61  
 Scherviskosität 2  
 Schlitzkapillare 24, 35  
 Schmelzeaustritt 36  
 Schmelzebruch 44  
 Schmelzeshomogenität 40  
 Schmelzestrang 44  
 Schmelzetemperatur 85  
 Schmelzeviskosität 7, 29, 84, 110  
 Schmelzezustand 87  
 Schmelzindex 18, 39, 41  
 Schmelzindexbestimmung 94  
 Schmelzindexmessungen 94  
 Schmelzpunkt 113  
 Schmelztemperatur 1  
 Schneckenkanal 77  
 Schubmodul G 48  
 Schubspannung 47, 57, 61  
 schubspannungsgesteuertes Rheometer 47  
 Schüttguttechnik 70  
 Schutzgasatmosphäre 32  
 Schwingungsrheometer 18  
 Searle 48  
 Sekundärware 113  
 Shish-Kebab-Struktur 88  
 Silikone 114  
 Silikonöle 114  
 Silikonkautschuk 114  
 Sollmaterial PA 6/6T 112  
 Spannungsrissempfindlichkeit 111  
 Spannversuch 9  
 Speichermodul G' 48  
 Spezifikationen 22  
 spezifische Viskosität 5, 26  
 Spritzguss 77  
 Standardmessgeometrie 47  
 stationäre Beanspruchung 57, 59  
 stationärer Strömungszustand 36  
 Stationarität 19  
 Staudinger-Funktion 27  
 Staudinger-Index 27  
 Staudinger-Kuhn-Gleichung 28, 122  
 Stick-Slip-Effekte 44  
 Stokes'sches Gesetz 73  
 Strangaufweitung 42, 78

Strömungsgeschwindigkeit 14  
Struktur  
– innere 61  
Strukturabbau 65  
Strukturaufbau 58  
Strukturbeeinflussungen 98  
Strukturbildung 88  
Strukturviskosität 88  
Styrolpolymerisaten 93

## T

Taylor-Wirbel 49  
teilkristallinen Thermoplasten 11  
Temperatureinwirkung 98  
Temperaturkonstanz 64  
Temperierung 44  
Temperierzeit 62  
Thermoplaste 1, 81, 121  
Thermoplast-Schmelze 4  
Thermostatisierung 48  
thixotropen Proben 62  
Thixotropie 64  
Topfzeit 95 ff., 99  
Topfzeitbestimmungen 99  
Transport- und Lagerstabilität 58  
Trennmittel 70  
Trimmen 62

## U

Ubbelohde-Viskosimeter 25  
Umesterung 85  
Umordnungsprozesse 48  
ungefüllte Polymerschmelzen 39  
Unterfüllung 62  
Unveränderlichkeit der Probe 44  
UP-Harze 97  
UV-Licht 108  
UV-Stabilisierung 110

## V

Varianz der Messergebnisse 58  
Variation des Düsenverhältnisses 41  
Verarbeitbarkeit 7, 96  
Verarbeitungsstufen 8  
vergleichende Messungen 57  
Verlustfaktor  $\tan \delta$  48

Verlustmodul  $G''$  48  
Vernetzung 95  
Vernetzungsreaktionen 103  
versprödete Dübel 108  
Vinylesterharze 96 f.  
viskoelastische Proben 54  
Viskosität 1 f.  
– kinematische 114  
– relative 5, 26  
– scheinbare 114  
Viskositätsangabe 66  
Viskositätsentwicklung 99  
Viskositätsmittelwert 83  
Viskositätstal 95  
Viskositätszahl 28, 94, 105, 123  
Viskositätszahl J 27  
Viskositätszahl VZ 26  
Viskosität unter Gegendruck 37  
Volumenviskosität 2  
Vorbehandlung 21  
VZ-Zahl 29

## W

Wandhaftung 36, 45  
Wandschergeschwindigkeit 24  
Wandscherspannung 24  
Wandschubspannung 35  
Wareneingang 26  
Wareneingangskontrolle 103  
Wärmeformbeständigkeit 7  
Wassergehalt 70  
Wechselwirkungen der Probe 54  
wirkende Strömung 11

## X

Xenotestgerät 107

## Z

Zähigkeit 7  
Zeitabhängigkeit 11  
Zeitfenster 19  
zeitunabhängige Viskosität 9  
Zersetzungsprodukten 61  
Zustand dieser Einlaufkante 70  
Zustandsbereiche 77  
Zylinder-in-Zylinder-Geometrie 51  
Zylinder-in-Zylinder-Messsysteme 15